

## Тепловой поток на северо-западе Тихого океана

Я. Б. Смирнов, В. М. Сугробов



Яков Борисович Смирнов, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Геологического института АН СССР. Занимается проблемами теплового поля Земли, геоэнергетики и геодинамики.



Виктор Михайлович Сугробов, кандидат геолого-минералогических наук, заместитель директора Института вулканологии ДВНЦ АН СССР, заведующий отделом геотермии и геохимии. Основные научные интересы связаны с геотермией вулканических областей, формированием современных гидротермальных систем и оценкой геотермальных ресурсов.

В северо-западной части Тихого океана расположены наиболее характерные геологические структуры зоны перехода от Азиатского континента к Тихому океану: вулканические островные дуги, тектонические и глубоководные желоба, впадины окраинных морей, подводные возвышенности. В этом регионе протекают активные геологические процессы, свидетельством которых являются высокая сейсмичность, перемещения отдельных блоков земной коры, современная вулканическая и гидротермальная деятельность. Поэтому его можно считать полигоном для построения геодинамической модели зоны перехода от Азиатского континента к океану.

Однако такую модель нельзя постро-

ить без знания теплового потока<sup>1</sup>, закономерности распределения которого позволяют охарактеризовать энергетический режим различных геологических структур и судить о движущем механизме их развития. Поэтому один из первых рейсов научно-исследовательского судна «Вулканолог» (27 мая — 26 июля 1977 г.) был посвящен изучению теплового потока.

Основной целью исследований являлось выяснение связей теплового поля с

---

<sup>1</sup> Тепловой поток — произведение градиента температуры, направленного по нормали к поверхности Земли, на теплопроводность среды. Единица измерения — кал/см<sup>2</sup>·с.

тектоническим строением<sup>2</sup>, сейсмичностью, вулканизмом и гидротермальной активностью.

Тепловой поток в рейсе измерялся в донных осадках акваторий Охотского и Берингова морей и северо-западной части Тихого океана (район между 46° и 57° с. ш. и 153° и 172° в. д.). Данные, полученные в рейсе (около 100 измерений), обрабатывались совместно с измерениями, выполненными нами в глубоких скважинах на Камчатке, а также с измерениями других исследователей в этом регионе.

(позднекайнозойской) Командорской котловине  $3,03 \cdot 10^{-6}$  кал/см<sup>2</sup>·с. Следовательно, тепловой поток во впадинах окраинных морей закономерно зависит от их возраста. Этот факт мы объясняем разным временем внедрения расплавленного вещества мантии (мантийного «теплового диапира»), приводящего к разрушению коры в этих впадинах.

Та же тенденция в распределении значений теплового потока прослеживается и в других тектонических структурах (см. табл.). Не останавливаясь подробно на этом

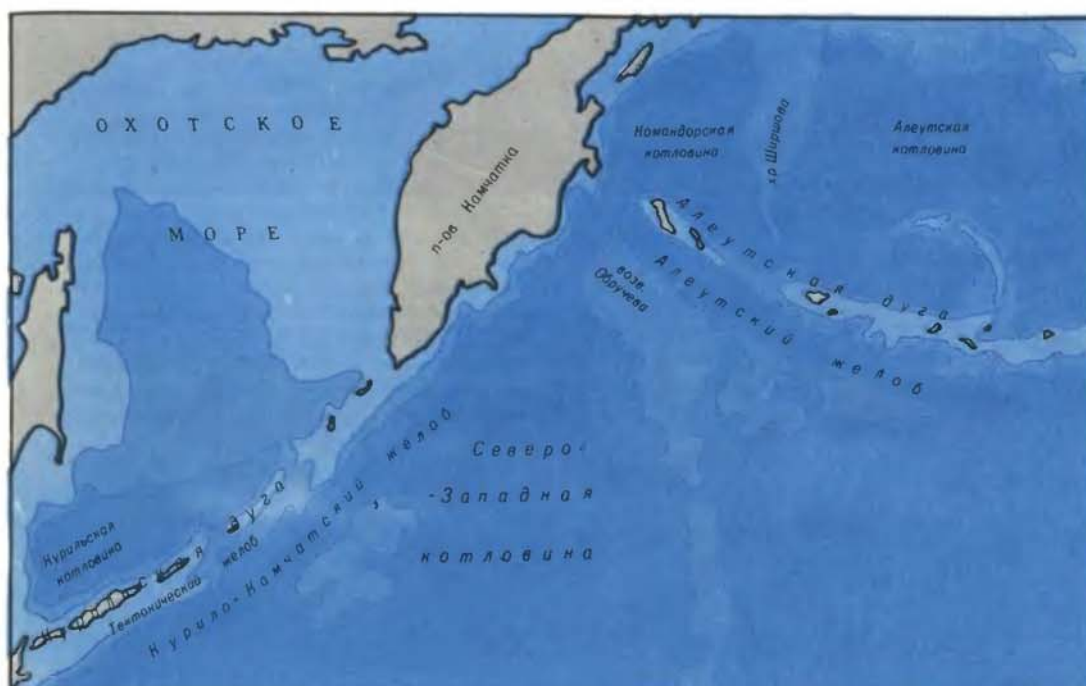


Схема расположения основных тектонических структур в районе исследования.

Тепловой поток в тектонических структурах Курило-Камчатской и Алеутской провинций

При этом оказалось, что тепловой поток в однотипных тектонических структурах разного возраста различен. Например, в наиболее древней Алеутской котловине с мезозойским возрастом основания тепловой поток равен  $1,34 \cdot 10^{-6}$  кал/см<sup>2</sup>·с, в более молодой (раннекайнозойской) Курильской котловине —  $2,3 \cdot 10^{-6}$  кал/см<sup>2</sup>·с и в еще более молодой

<sup>2</sup> Для сопоставления использовались Тектоническая карта Евразии (М., 1966) и Тектоническая карта Тихоокеанского сегмента (М., 1972).

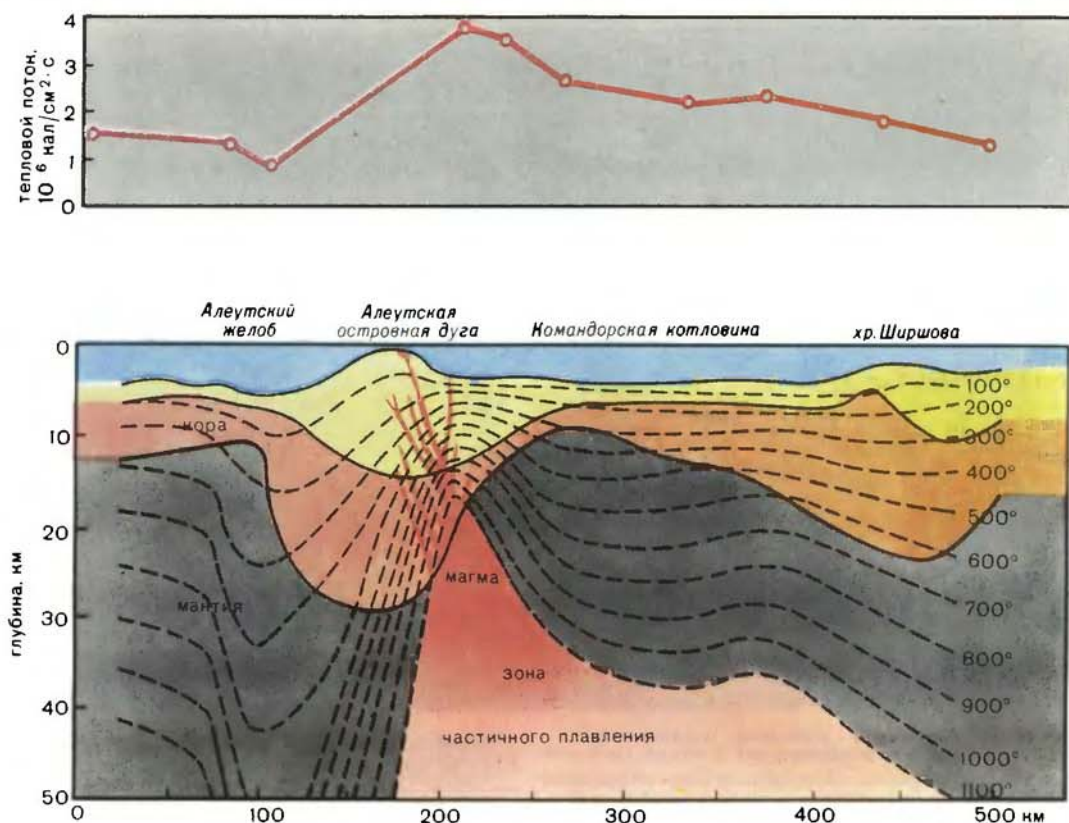
Тектоническая структура	Среднее значение теплового потока: в кал/см <sup>2</sup> ·с · 10 <sup>-6</sup>
Северо-западная котловина	1,33
Возвышенность Обручева	1,70
Курило-Камчатский желоб	1,05
Алеутский желоб	1,17
Тектонический желоб	0,81
Курильская дуга	2,02
Алеутская дуга	2,22
Курильская котловина	2,36
Командорская котловина	3,03
Хребет Ширшова	2,07
Алеутская котловина	1,34
Восточно-Камчатский вулканический пояс	1,30



вопросе отметим, что минимальные значения теплового потока установлены в докайнозойском тектоническом Курило-Камчатском желобе, совпадающем с подводным хребтом Витязь. Эта структура, протягивающаяся вдоль Курильских о-вов и Камчатки, выделяется большой мощностью коры. Зона минимальных значений теплового потока в ней совпадает с областью максимальной концентрации очагов землетрясений глубиной до 100 км. Мы вернемся к этому факту в дальней-

шем, когда попытаемся объяснить связь теплового потока с сейсмичностью.

Иная картина распределения теплового потока в зонах новейшего вулканизма Камчатского п-ова и Курильской и Алеутской островных дуг. Здесь выделяются два основных типа распределения теплового потока: высокие его значения ( $2,2—2,5 \cdot 10^{-11}$  кал/см<sup>2</sup>·с), характерны для вулканических областей, унаследованных с палеогена; нормальные ( $1,0—1,3 \cdot 10^{-11}$  кал/см<sup>2</sup>·с) — для областей со-



Распределение поверхностного теплового потока [вверху] и изолиний температур в земной коре и верхней мантии [внизу] по профилю глубинного сейсмического зондирования через Алеутский желоб, Алеутскую островную дугу, Командорскую котловину и поднятие Ширшова.

Под Алеутской островной дугой и Командорской котловиной изотерма 1100°, примерно соответствующая температуре частичного плавления вещества верхней мантии, наиболее приближена к поверхности. Эта магматическая зона питает корни вулканов, сформировавших вулканическую гряду 2—3 млн лет назад и продолжающих действовать в настоящее время.

временного вулканизма (Восточно-Камчатский вулканический пояс).

Дело в том, что поверхностный (кондуктивный) тепловой поток в этих зонах фактически соответствует тепловому потоку более древнего основания, так как требуется 20—40 млн лет, чтобы тепло от недавно возникших зон плавления на глубинах 40—80 км дошло до поверхности Земли. В то же время здесь уже возникли активные вулканы и гидротермальные системы, поставляющие на Землю огромное количество тепла конвективным путем.

Полученные результаты дали воз-

можно в целом считать, что в северо-западной части зоны переходы от Азиатского континента к Тихому океану величины общего выноса тепла уменьшаются при увеличении возраста тектоно-магматической активности. Как было показано нами ранее<sup>3</sup>, такая закономерность справедлива для всех тектонических структур континентов, и, как стало ясно недавно, для всех тектонических структур океана. Иными словами, каждой тектонической структуре в определенный этап ее развития соответствуют совершенно определенные затраты тепловой энергии. Этот вывод чрезвычайно важен для решения вопроса о движущих механизмах тектонического развития, так как тепловая энергия Земли играет ведущую роль в геологическом развитии нашей планеты, и это в настоящее время признают большинство геологов. Действительно, подсчитано, что кондуктивный тепловой поток, передающийся через решетку твердых горных пород из глубин Земли, составляет не менее 90—95% от общих энергопотерь; затраты же энергии на геологические процессы — магматизм, сейсмичность, горообразование, складчатость, метаморфизм и т. п. — не превышают в глобальном масштабе 5—10%, т. е. составляют очень незначительную часть от кондуктивного теплового потока. Поэтому мы вправе считать, что геологическая эволюция Земли в целом и развитие отдельных тектонических структур в частности — прямое следствие пространственно-временных вариаций теплового поля.

Вместе с тем данные о тепловом потоке, помимо количественного выражения потерь тепловой энергии через поверхность той или иной структуры, дают важнейшую информацию о термодинамических условиях в литосфере, энергетике геологических процессов, а значит и о конкретных движущих механизмах тектогенеза.

Так, по результатам измерений теплового потока, выполненных в рейсе по профилю глубинного сейсмического зондирования, пересекающему Алеутский глубоководный желоб и Алеутскую островную дугу, Командорскую котловину и хребет Ширшова в Беринговом море, были построены кривые распределения темпера-

туры на глубине<sup>4</sup>. Характерной особенностью температурного поля является высокое положение под Командорской котловиной и Алеутской островной дугой изотермы 1100°, примерно соответствующей температуре частичного плавления вещества верхней мантии. Максимальный подъем зоны расплава наблюдается вблизи Алеутской дуги. Именно эта магматическая зона и питает корни вулканов, сформировавших вулканическую гряду 2—3 млн лет назад и продолжающих действовать в настоящее время. Аналогичная картина в распределении температур наблюдается и в Восточно-Камчатской вулканической зоне, и в пределах Курильской островной системы. Так что наличие неглубоко залегающего теплового «диапира», представляющего собой расплавленную зону мантийного вещества, по-видимому, является общим признаком всех активных окраин Тихого океана.

Не исключено, что высокое положение зоны плавления служит причиной разрушения (деструкции) континентальной коры, существовавшей ранее под впадинами окраинных морей Тихоокеанского активного кольца. Деструкцию коры по периферии Тихого океана крупнейший тектонист Н. С. Шатский считал главным отличием развития тихоокеанских и альпийских структур.

Подъем зоны расплава под системами островных дуг прямо связан с современной вулканической активностью в пределах Тихоокеанского кольца. При вулканизме тепло выносится конвективным путем (т. е. магмой и гидротермами), причем количество его может быть очень велико. Например, при последнем извержении вулкана Плоский Толбачик на поверхность было вынесено примерно 2 км<sup>3</sup> лавы (т. е. около  $2 \cdot 10^{18}$  кал). Для сравнения укажем, что в вулканических областях кондуктивным (т. е. через породы) путем данное количество тепла теряется с пло-

<sup>4</sup> Расчет глубинных температур проводится по уравнению теплопроводности с учетом внутренних источников тепла. При этом тепловое поле считается стационарным (хотя возможны и нестационарные варианты расчета), а распределение источников тепла, связанных с распадом радиоактивных изотопов урана, тория и калия, в основных слоях земной коры и в верхней мантии, а также теплопроводность этих слоев определяются исходя из геохимических и петрологических моделей тектоносферы. Погрешность расчетов оценивается величиной 10—20%.

<sup>3</sup> Поляк Б. Г., Смирнов Я. Б. Тепловой режим Земли. — «Природа», 1970, № 5.



Спуск термоградиентографа с борта научно-исследовательского судна «Вулканолог».  
Фото В. М. Сугробова.

щади 10 тыс. км<sup>2</sup> в течение примерно 500 лет.

Естественно, конвективный вынос тепла на поверхность не может быть зафиксирован при измерениях кондуктивного теплового потока; его величина оценивается по объему излившегося материала и удельным потерям тепла при застывании. Геологическое изучение вулканических районов представляет нам такой материал. В частности, количество излившегося материала в Восточно-Камчатской вулканической зоне составляет за четвертичный период около 11 тыс. км<sup>3</sup>, для Центрально-Камчатской вулканической зоны — 8,5 тыс. км<sup>3</sup> и т. д. Без очень больших погрешностей можно считать, что кора вулканических островных дуг — Алеут-

ской, Курильской и др. сформирована в результате надводных и подводных вулканических процессов. А так как мощность коры известна по данным глубинного сейсмического зондирования, оценить потери тепла конвективным путем на островных дугах также невозможно. Например, вынос тепла в удельном выражении для Алеутской и Курильской островных дуг равен  $1,6 — 3,2 \cdot 10^{-6}$  кал/см<sup>2</sup> · с<sup>5</sup>. Поэтому, составляя общее уравнение расходной части энергетического баланса для зон перехода континента к океану, необходимо сложить указанные цифры с кондуктивным тепловым потоком.

Распределение теплового потока и глубинных температур в системах остров-

<sup>5</sup> Разброс цифр связан с погрешностями учета объема лав и пирокластического материала во времени, а также количества тепла, выносимого термальными водами и т. д., что трудно поддается точной оценке.



ных дуг имеет еще одну замечательную особенность — величины этих параметров резко изменяются в области глубоководного желоба и прилегающей части океана. В результате здесь возникают очень высокие горизонтальные градиенты теплового потока и, соответственно, температур. Именно в этой зоне выделяется более 90% всей сейсмической энергии как в рассматриваемом регионе, так и по всему сейсмическому кольцу Тихого океана.

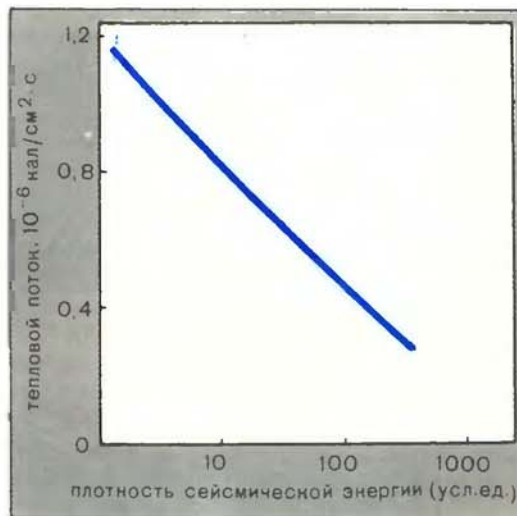
Такая связь не случайна и свидетельствует о трансформации определенной части глубинного тепла в сейсмическую энергию. Количество тепловой энергии, переходящей в сейсмическую, строго оценить пока очень трудно. Проводя измерения теплового потока во втором рейсе «Вулканолога», мы пытались сопоставить наши результаты с плотностью сейсмической энергии. В результате было установлено, что плотность сейсмической энергии увеличивается при уменьшении плотности теплового потока.

Максимальная плотность сейсмической энергии в пределах Курило-Камчатской дуги совпадает с зонами наименьших значений теплового потока ( $0,4\text{--}0,6 \cdot 10^{-6}$  кал/см<sup>2</sup>·с), значения теплового потока в асейсмичных участках соответствуют среднемировым — порядка  $1,2\text{--}1,4 \cdot 10^{-6}$  кал/см<sup>2</sup>·с. Так что разница между этими величинами ( $0,6\text{--}0,8 \cdot 10^{-6}$  кал/см<sup>2</sup>·с) может обозначать количество тепла, трансформируемого в сейсмотектоническую энергию. Полученная нами цифра почти совпала с плотностью энергии сейсмических волн — около  $0,6 \cdot 10^{-6}$  кал/см<sup>2</sup>·с, вычисленной для этого региона С. А. Федотовым в 1968 г. Пока мы рассматриваем полученную зависимость как возможную тенденцию, требующую дальнейшего подтверждения большим фактическим материалом и физическими моделями очага землетрясения.

Возвращаясь к тепловому балансу переходных зон, мы должны, естественно, учесть в структуре расхода энергии трансформацию определенной части тепла в сейсмическую энергию. За неимением более детальных оценок, мы воспользуемся пока полученными цифрами ( $0,6\text{--}0,8 \cdot 10^{-6}$  кал/см<sup>2</sup>·с). В итоге общий расход энергии в системах островных дуг при полном учете кондуктивного и конвективного выноса тепла и трансформации тепловой энергии в сейсмотектоническую может достигать величин  $6\text{--}11 \cdot 10^{-6}$  кал/см<sup>2</sup>·с.

Сравнивая эти цифры с потерями тепла в рифтовых зонах срединно-океанических хребтов, можно сделать вывод об энергетическом сходстве этих глобальных активных поясов Земли, несмотря на некоторые различия в самой структуре энергетического баланса (в частности, сейсмическая энергия в рифтовых зонах срединно-океанических хребтов не играет существенной роли и на 3—4 порядка ниже кондуктивного теплового потока).

Какие же процессы могут привести к столь высокой концентрации энергии в



Соотношение теплового потока и плотности сейсмической энергии в районе исследований. С увеличением измеренного теплового потока плотность сейсмической энергии уменьшается.

системах островных дуг? В рамках гипотезы новой глобальной тектоники вопрос концентрации энергии решается следующим образом. В центральных частях срединно-океанических хребтов происходит внедрение расплавленного мантийного материала, раздвигающего жесткие литосферные плиты и создающего современный рельеф срединных хребтов и высокие потери тепла в их осевых частях. В процессе движения от срединно-океанических хребтов к окраинам континентов или островным дугам жесткие литосферные плиты мощностью около 100 км охлаждаются и поглощаются в зонах Бень-оффа (зонах концентрации очагов землетрясений), двигаясь под углом вниз. В результате создается замкнутая кон-

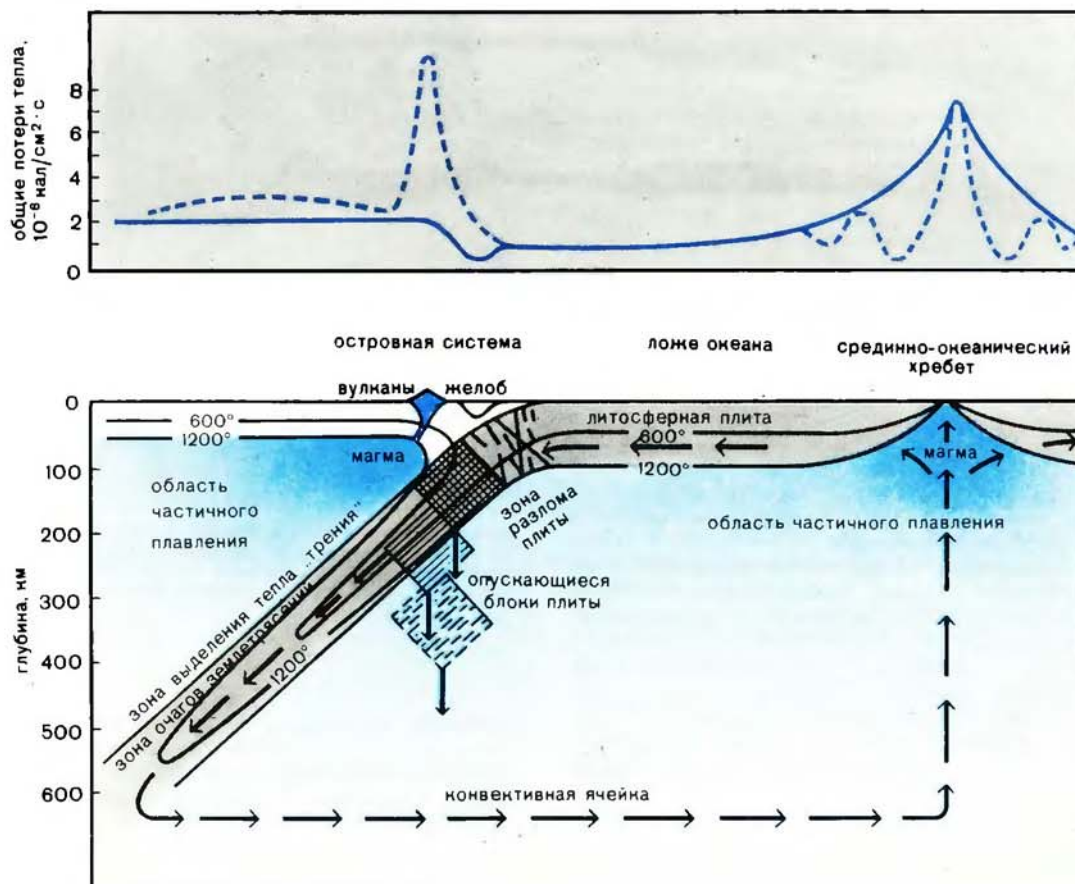
вективная ячейка длиной в несколько тысяч километров и глубиной до 700 км.

Предполагается, что погружение литосферной плиты приводит к тектонической активности континентальных окраин, их сейсмичности и вулканизму. Энергетически эти процессы обеспечиваются выделением так называемого тепла трения на верхней границе погружающейся плиты, которая холоднее окружающей среды в среднем на  $600^{\circ}\text{C}$  и плотнее ее примерно на  $0,05\text{--}0,01\text{ г/см}^3$ , вследствие чего она и «тонет» в менее

плотной мантии. Рассмотренная модель вызывает ряд возражений. Мы остановимся лишь на трех из них.

Во-первых, модель более или менее объясняет наблюдаемое распределение кондуктивного теплового потока и не объясняет общих очень высоких потерь энергии.

Во-вторых, положение зон высокого теплового потока в окраинных морях фактически не связано с зоной Бенъоффа, в которой, как предполагается, выделяется «тепло трения». Действительно, эта зона



Динамическая и тепловая модель островной системы, составленная на основе гипотезы перемещения литосферных плит. На графике [вверху] — теоретический (сплошная линия) и действительный (пунктир) расход тепловой энергии в системах островных дуг и на срединно-океанических хребтах.

уходит под Командорские о-ва почти вертикально, а тепловой поток высок во всей Командорской впадине.

И, в-третьих, нисходящая литосферная плита не может иметь той геометрической формы, которая показана на рисунке. Действительно, как неоднократно отмечалось Е. В. Артюшковым, в месте изгиба плиты в соответствии с законами механики возникнут колоссальные на-

пряжения растяжения и сжатия, раскалывающие плиту на отдельные блоки. Под действием силы тяжести они будут вертикально опускаться вниз. Это положение соответствует фактическому материалу, так как углы наклона зоны очагов землетрясений непостоянны и варьируют под конкретными структурами континентальных окраин примерно от 30 до 90°.

Так что с энергетической стороны концепция новой глобальной тектоники, хотя и привлекательна, но еще далека от совершенства. Для островных систем предпочтительным кажется механизм концентрации энергии вследствие локализованного вертикального тепломассопереноса из очень глубоких зон Земли, возможно, от ее ядра. Этот механизм может быть общим для всех тектонически-активных поясов нашей планеты.

Итак, проведенные исследования дали возможность установить пространственные и временные закономерности распределения теплового поля в северо-западной части Тихого океана. Анализ этих данных показал, что зонам высокого теплового потока соответствуют аномально высокие вертикальные градиенты температур в земной коре и верхней мантии, приводящие к подъему частично расплавленного мантийного вещества, и, как следствие этого — к современной вулканической и гидротермальной активности островных дуг. В этих местах высокие вертикальные градиенты температур существенно снижают скорости сейсмических волн в верхах мантии, уменьшают ее плотность и вязкость, что существенно сказывается на геофизических полях. В мантии под желобами наблюдается резкое снижение теплового потока и вертикальных градиентов температуры, увеличение горизонтальных градиентов температуры, определяющих, возможно, поле упругих напряжений и сейсмическую активность.

Поэтому, не затрагивая многих вопросов, связанных с применением геотермических данных к анализу геолого-геофизических процессов, мы можем сказать, что изучение теплового потока дает важнейшую информацию о возрасте тектоно-магматической активности, строении и мощности коры, термодинамических условиях, структуре энергетического баланса и механизмах развития тектоносферы. Здесь уместно вспомнить высказывание известного американского петролога Дж. Ферхугена: «Геолог, задавшийся

целью удовлетворительно объяснить механизм таких явлений, как дислокация, горообразование или магматизм, неизбежно приходит к выводу, что главный источник энергии в этих процессах — теплота. То, что происходит на поверхности, зависит от характера источников тепла и их положения»<sup>6</sup>.

<sup>6</sup> Ферхуген Дж. Температура в недрах Земли. — В сб.: Физика и химия Земли. М., 1958.

#### РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

ВУЛКАНИЗМ, ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЙ ПРОЦЕСС И РУДООБРАЗОВАНИЕ. М., 1974.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ О БОЛЬШОМ ТРЕЩИННОМ ТОЛБАЧИНСКОМ ИЗВЕРЖЕНИИ 1975—1976 гг. М., 1978.

Мархинин Е. К. ПРЕДБИОЛОГИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ В ПЕПЛЕ ВУЛКАНА. — «Природа», 1974, № 8.

Мархинин Е. К. ЦЕПЬ ПЛУТОНА. М., 1973.

СОВРЕМЕННЫЕ ГИДРОТЕРМЫ И МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЕ. М., 1974.

Чирков А. М. ТОЛБАЧИНСКОЕ ИЗВЕРЖЕНИЕ. — «Природа», 1976, № 4.

Цюрупа А. И. ВУЛКАН НОЧЬЮ. — «Природа», 1979, № 2.